

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук Калитенко Александра Михайловича
на тему: «Исследование влияния динамики пучка электронов на
генерацию гармоник в однопроходных лазерах на свободных
электронах»
по специальности 1.3.3. Теоретическая физика**

В последние годы лазеры на свободных электронах (ЛСЭ), обладающие высокой яркостью и когерентностью излучения, находят все большее практическое применение для проведения высокоточных и времяразрешающих исследований в кристаллографии, биологии, медицине и материаловедении. Трехмерное описание динамики излучения ЛСЭ является довольно сложной задачей, допускающей аналитические решения лишь в ряде приближений. В связи с этим для более полного описания требуется использование численных методов.

Диссертационная работа А.М. Калитенко посвящена теоретическому исследованию влияния динамики электронного пучка на генерацию гармоник в однопроходных лазерах на свободных электронах. Актуальность работы определяется как получением новых аналитических выражений для коэффициентов связи между электронами и излучением с учетом бетатронных колебаний и сдвига фаз электронов относительно фотонов в плоских и спиральных ондуляторах, так и разработкой новых программ расчетов генерации гармоник в ЛСЭ, включая новые модели тейперинга (т.е. изменения параметра ондуляторности вдоль оси лазера), и применение искусственных нейронных сетей, что позволяет уменьшить время, необходимое для анализа конфигураций ЛСЭ, на несколько порядков по сравнению с традиционными численными методами.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 110-ти страницах, содержит 59 рисунков, 5 таблиц, список условных обозначений и список литературы из 110-ти наименований.

Во **введении** дан краткий обзор и исторический анализ развития теоретических и экспериментальных исследований в области синхротронного излучения и лазеров на свободных электронах.

Глава 1 посвящена анализу основных теоретических аспектов изучения излучения ЛСЭ. Выводятся и обсуждаются необходимые для расчетов формулы излучения релятивистского электрона в периодическом магнитном поле ондулятора. В одномерном приближении последовательно получены соотношения, описывающие траекторию движения электронов, выражение для их средней скорости, проведен анализ взаимодействия излучения с электронами, получены условие резонансного усиления, уравнения, которые определяют эволюцию фазы электронов и энергии в зависимости от времени и уравнение для амплитуды электрического поля. В итоге получены основные выражения для усилителя на основе ЛСЭ, такие как пространственное увеличение интенсивности вдоль оси ЛСЭ, длина усиления и параметр масштабирования Пирса. Показано, что квантовые эффекты не играют существенную роль даже в современных рентгеновских лазерах на свободных электронах, поэтому с хорошей точностью можно использовать классическую электродинамику.

Глава 2 посвящена изложению основных теоретических принципов и алгоритмов работы авторских программ для численного моделирования излучения гармоник в однопроходном ЛСЭ. В настоящей работе автором написана трехмерная численная программа на языке C++, которая учитывает следующие эффекты в ЛСЭ: аксиальную асимметрию пучка электронов, их разброс по энергии, бетатронные колебания, изначальное шумовое излучение, кулоновское взаимодействие, сдвиг поля по отношению к частицам, квадрупольные секции и сдвиг фаз между секциями ондуляторов. Считаю крайне положительным, что программа имеет три режима работы: 1) усилитель без шума, 2) усилитель с изначальным шумом, 3) самоусиленное спонтанное излучение (SASE). В диссертации обсуждены существующие алгоритмы создания случайных шумов в ЛСЭ, описан процесс вычисления

динамики каждой макрочастицы и поля излучения гармоник, на основе которых проводится решение уравнений для амплитуды поля излучения и гармоник электростатического поля. Особое внимание уделено учету высших гармоник поля излучения, которые могут возникать в ондуляторах за счет продольных колебаний электронов в пучке. Продемонстрирована работа программы на примере однопроходных ЛСЭ с плоским одночастотным ондулятором. В заключительных разделах главы проводится сравнение результатов программы с экспериментами и анализ сходимости программ. Показано удовлетворительное согласие работы авторской программы с программами GENESIS и PERSEO, а также программы автора для усилителя ЛСЭ с экспериментальными параметрами LCLS (США) в режиме мягкого рентгеновского излучения.

Глава 3 посвящена анализу влияния бетатронных колебаний в различных конфигурациях магнитных полей ондулятора на генерацию как основной, так и высших гармоник излучения ЛСЭ. На примерах плоского одночастотного и спирального ондуляторов получены соответствующие аналитические соотношения для движения электронов, спектрально-углового распределения энергии излучения, коэффициентов связи в зависимости от параметров ондулятора для четных и нечетных гармоник, а также для резонансных частот с учетом их расщепления из-за бетатронных колебаний. В случае второй гармоники получены новые коэффициенты связи, которые отличаются от ранее используемых в программе GENESIS, в том числе и учетом Y-поляризации.

В разделе 3.2 на основе разработанной автором численной программы на языке C++ с использованием параллельных вычислений проведено моделирование ЛСЭ с учетом второй гармоники и показано хорошее согласие с результатами экспериментов на LCLS в мягкой рентгеновской области, в которых была обнаружена вторая гармоника излучения. В случае спирального ондулятора расчетным путем получено, что на определенной длине ЛСЭ пространственное распределение интенсивности второй

гармоники приобретает вид вихря, что было экспериментально обнаружено в 2014 г. и объясняется изменением направления скорости бетатронных колебаний, так как между секциями ондулятора стоят фокусирующие и дефокусирующие секции. Следует подчеркнуть, что в программе соискателя имеется автоматическая регулировка фокусировки, чтобы динамика пучка соответствовала экспериментальным данным.

Глава 4 посвящена исследованию различных моделей в методе тейперинга, который заключается в специальном образом подобранном изменении параметра ондулятора $K(z)$ вдоль оси лазера для повышения эффективности извлечения энергии из электронного пучка, т.е. для поддержания состояния резонанса, поскольку электроны теряют энергию при излучении и лоренц-фактор электрона уменьшается. В начале главы автор кратко перечислил несколько способов оптимизации профиля тейперинга (метод многомерного сканирования, алгоритм самопроектирования GINGER, который основан на модели Кролла–Мортон–Розенблюта (KMP), GENESIS, FAST и др.).

В настоящей работе разработана компьютерная программа расчетов тейперинга на основе модифицированного метода KMP. В разделе 4.2 выполнено зависящее от времени моделирование эксперимента с самозатравкой и усилителем в предположении о линейном увеличении резонансной фазы с расстоянием, которое показало хорошее согласие с экспериментальными данными, полученными на рентгеновском ЛСЭ в ускорительной лаборатории Поханга (PAL-XFEL) в Республике Корея, где достигнуто насыщение пучка лазера на длине волны 0.85 \AA .

В разделе 4.3 на основе разработанной автором программы предложены методы подавления высших гармоник излучения в ЛСЭ с тейперингом с использованием добавления как постоянного, так и переменного фазового сдвига электронного сгустка относительно излучения после каждой секции ондулятора. Показано, что использование переменного фазового сдвига с его уменьшением по длине лазера является более

продуктивным, так как подавляет генерацию третьей гармоники в начале, но сохраняет мощность основной гармоники в конце лазера.

Глава 5 содержит изложение нового математического подхода к описанию генерации излучения в лазере на свободных электронах, который основан на машинном обучении и позволяет на порядки уменьшить время расчетов для анализа конфигураций ЛСЭ. Тем самым разработана методика для быстрой оптимизации большого числа параметров ЛСЭ для реализации более эффективной генерации излучения.

Архитектура и обучение нейронной сети были проведены автором на основе предварительного анализа таких различных моделей машинного обучения как Random, Forest, XGBoost, нейронная сеть с MTL и без нее. Нейронная сеть представляет собой фактически некую неявную многомерную функцию зависимости выходных параметров излучения ЛСЭ (оптимальная длина волны излучения, мощность и длина насыщения и т.п.) с такими входными характеристиками начального пучка и ондулятора, как параметр и период ондулятора, мощность начального источника, лоренц-фактор электронов и их энергетический разброс, пиковый ток, средний размер электронного пучка и т.п.

Нейронная сеть была построена с использованием библиотеки PYTORCH на языке программирования Python. В качестве архитектуры нейронной сети была использована многомерная регрессия (многозадачная нейронная сеть, MTL) с функцией потерь (невязки) в методе наименьших квадратов. Нейронная сеть обучалась путем минимизации функции потерь с использованием метода градиентного спуска. В целом для обучения были использованы данные примерно 1700 различных конфигураций ЛСЭ, полученных с помощью численного моделирования с разделением данных на обучающую, валидационную и тестовую выборки в отношении примерно 80/10/10 соответственно. Убедительно показано достаточно быстрое уменьшение функции потерь на обучающей и валидационной выборках.

В заключительном разделе 5.4 проанализированы и проверены результаты работы обученной нейронной сети в различных диапазонах длин волн излучения и показано очень хорошее согласие с результатами, полученными как с помощью программы численного моделирования, так и на примере эксперимента SPARC (2004 г.).

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертации. Они являются новыми, достоверными и своевременно опубликованы в ведущих научных журналах.

В качестве наиболее важных и интересных результатов, полученных в диссертации, можно отнести следующие:

1. Получены новые аналитические выражения для коэффициентов связи между электронами и излучением с учетом бетатронных колебаний для излучения в плоских и спиральных ондуляторах.
2. Предложены новые методы подавления высших гармоник на этапе формирования излучения в ЛСЭ с тейперингом с применением фазовых сдвигов электронов относительно фотонов.
3. Разработан принципиально новый подход к описанию ЛСЭ на основе нейронных сетей, что позволяет уменьшить на порядки время анализа конфигураций ЛСЭ.

В целом диссертация А.М. Калитенко представляет собой законченное исследование, выполненное по актуальной тематике. Все четыре положения, выносимых на защиту, сформулированы правильно и обоснованно. Сформулированные в диссертации научные выводы и рекомендации имеют важное научное и практическое значение для моделирования поведения гармоник излучения в лазерах на свободных электронах с плоскими и спиральными ондуляторами, для расширения круга новых оптимальных конфигураций ЛСЭ и для снижения затрат временных ресурсов.

Диссертация хорошо оформлена и логично построена. Многочисленные рисунки исчерпывающим образом иллюстрируют основные результаты и выводы. Основные результаты диссертации опубликованы соискателем в

пяти статьях в высокорейтинговых журналах, причем во всех статьях он является единственным автором. Автореферат правильно, хотя и излишне кратко и без иллюстраций, отражает основное содержание диссертации.

По диссертационной работе А.М. Калитенко можно сделать следующие замечания:

1. На стр. 37 и далее в разделе о создании фазового пространства пучка электронов содержатся рисунки 2.1 - 2.3, которые в явном виде никак не описаны и не прокомментированы в тексте. То же самое касается и рисунков 2.5, 2.7, 2.8, 2.10, 3.2 и 3.4 на стр. 45, 48, 50, 58 и 60. Все это очень сильно усложняет понимание и оценку результатов, полученных автором.
2. Желательно было бы пояснить в тексте диссертации, из каких соотношений получено достаточно сложное выражение (3.11) на стр. 55 для резонансных частот при анализе движения электрона с учетом бетатронных колебаний в плоском ондуляторе.
3. В главе 5 представлено сравнение результатов численного моделирования и нейронной сети лишь на примере изменения мощности основной гармоники в усилителе в жестком рентгеновском диапазоне, тогда как большая часть диссертации посвящена анализу генерации гармоник. Было бы крайне интересно сравнить результаты также и на примере подавления излучения высших гармоник в ЛСЭ с тейперингом.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.3. Теоретическая физика (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите

диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Калитенко Александр Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,
Профессор кафедры физики твердого тела физического факультета
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова»

Бушуев Владимир Алексеевич

22 марта 2026 г.

Контактные данные:

тел.: 7(985)9671220, e-mail: vabushuev@yandex.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:
01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Адрес места работы:

119991, г. Москва, ГСП-1, МГУ имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы,
д. 1, стр. 2, физический факультет, кафедра физики твердого тела
Тел.: 8(495)939-23-87; e-mail: kftt.ff@org.msu.ru

Подпись проф. В.А. Бушуева удостоверяю:

И.о. декана физического факультета МГУ

Профессор

23 марта 2026 г.

В.В. Белокуров